

# 河川増水における橋梁上部構造流出に関する信頼性の検討

## A study on the reliability of the bridge superstructure outflow in rivers swollen

16N3100034G 光永 憲弘 (設計工学研究室)  
norihito MITSUNAGA/ Design Lab.

**Key Words :** superstructure, fluid force, probability density function, fracture probability

### 1. はじめに

近年、全国各地で前線や台風などに起因する異常な集中豪雨により、河川の増水が発生している。気象庁のアメダス観測点の観測結果より近年の集中豪雨の発生回数は増加傾向にあることがわかっている。

我が国の河川は急勾配で短距離という特徴を持つため大雨が降ると洪水になりやすい。河川増水時には、河川に架かる橋梁の上部構造の流出、橋脚の洗掘・折損といった被害が発生している。今後、河川増水時には上部構造流出等の橋梁被害の発生が危惧される。

鉄道橋・道路橋への被害は交通機能に影響を及ぼし、多くの利用者の生活に支障をきたす。また、橋梁の上部構造流出による二次災害なども考えられる。このことから河川増水による橋梁への被害の評価や検討が必要となる。そこで本研究では、今後流出の危険性がある橋梁を評価対象とし上部構造流出被害を評価する。具体的には、橋梁の上部構造流出に関して確率論を用いた信頼性の検討を行い、流出被害を軽減させるための合理的な橋梁設計を検討する。また本研究は、橋軸直角方向のみの力を想定し検討を進めている。

### 2. 評価対象地域・橋梁

対象とする地域の選定にあたり、アメダス観測点データを用いて都道府県ごとで再現期間100年の確率降水量を算出した。その結果、上位3県が奈良県・三重県・高知県となった。この3県に関して地形に着目すると、三重県には大台ヶ原山が存在し、そこは太平洋側からの湿った風の影響で多雨地帯となる事が分かっている。その結果、大台ヶ原山の下流側に位置する三重県内の宮川水系では多くの雨水が流れ込み、河川が増水する可能性が高いと考えられる。また、過去発生した上部構造流出被害を受けた橋梁は、河川上・中流部に位置するものが多く、この宮川水系の土地利用を見ると、河川上・中流部が多く存在する事が分かる。以上の事から、対象地域は三重県の宮川水系とする。宮川水系の位置は図-1に示す。

宮川水系内に架かる橋梁の中で、対象橋梁の種類として鋼製の道路橋を対象とし、その中で橋長30.0m以上



図-1 宮川水系位置図

表-1 対象橋梁の形式・完工年・寸法

橋梁名	完成年次 [西暦]	径間毎の 桁長[m]	総桁長 [m]	桁幅[m]	支承の種類	構造形式	
桧原橋①③	1981	19.4	71.1	7.2	線支承	合成桁橋	
桧原橋②		30.2			線支承		
野又橋①	1962	31.9	31.9	3.5	線支承		
新園井橋①	1966	39.9	60.1	6.0	ピン支承		
新園井橋②		19.9			ピン支承		
本真橋①③	1965	10.0	36.0	6.5	線支承		
本真橋②		16.0			線支承		
狹原橋①	1956	95.7	95.7	6.0	線支承+ピン支承		逆ランガー桁橋
尾合橋①	1971	75.0	75.0	7.5	ピン支承		ランガー桁橋
藤橋①	1967	36.1	36.1	5.9	支承板支承		合成桁橋
寺浦橋①②	1974	20.5	40.9	6.5	線支承		
新横輪橋①	1980	31.0	31.0	7.5	支承板支承		
新橋①②③	1971	20.0	61.5	6.5	線支承		
一之瀬橋①③	1965	16.5	52.1	7.0	支承板支承		
一之瀬橋②		19.1			支承板支承		

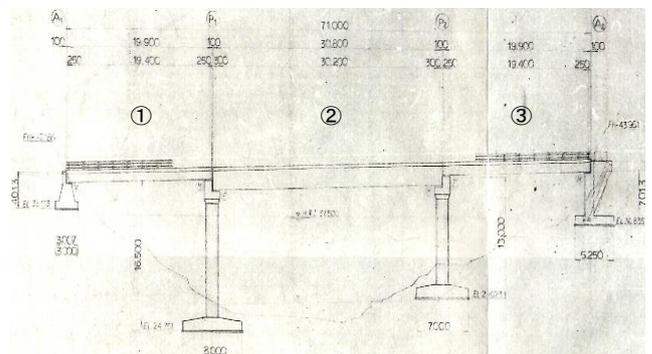


図-2 桧原橋一般図

～150.0m以下・幅員3.0m以上～7.5m以下・径間数3以下という条件の下で橋梁をピックアップし、さらにその中で詳細な図面が得られた表-1の計11橋梁を評価対象とした。表中の橋梁名に記載されている①②③の数字は、橋梁を径間毎で分類するための数字であり、例として図-2に桧原橋の一般図を示す。また、宮川水系内の対象

橋梁の位置は図-3に示す。

### 3. 流体力・抵抗力の設定

#### (1) 上部構造に水位が達する時に作用する流体力

本研究で評価する上部構造水没時の流体力 $S$ は、水位が徐々に増加し、橋桁の全面と背面とでの水位を同程度と見做すことで、上部構造に作用する流体力 $S$ は式(1)で表わされる<sup>3)</sup>。

$$S = \frac{1}{2} \rho_w C_d A v^2 \quad \text{式(1)}$$

ここに、 $\rho_w$ :水の密度[kg/m<sup>3</sup>],  $v$ :流速[m/s],  $C_d$ :抵抗係数,  $A$ :構造物を流れ方向に投影した面積[m<sup>2</sup>].  
また、抵抗係数 $C_d$ は式(2)の条件から求める<sup>4)</sup>。

$$C_d = 2.1 - 0.1 \left( \frac{B}{D} \right) \quad 1 \leq \frac{B}{D} < 8 \quad \text{式(2)}$$

ここに、 $B$ :桁の総幅員[m],  $D$ :桁の総高[m].

#### (2) 上部構造に水位が達する時に作用する抵抗力

流体力 $S$ が上部構造に作用することで生じる抵抗力 $R$ は、支承部において上部構造の重量と摩擦係数をかけた摩擦による抵抗力と支承部の構造的要因による抵抗力との和とし、式(3)で表わす。

$$R = \mu(W - U) + R_b \quad \text{式(3)}$$

ここに、 $\mu$ :最大摩擦係数(0.6),  $W$ :上部構造重量[N],  $U$ :上部構造に生じる浮力[N],  $R_b$ :支承部の構造的要因による抵抗力[N].

支承部の構造的要因による抵抗力とは、上部構造が流体力を受け橋軸直角方向へ移動する際、それを妨げるような支承構造のせん断力の事である。対象橋梁の支承の種類は線支承・ピン支承・支承板支承の3種類に分けられ、それぞれの支承で図-4に示した箇所でのせん断力を計算し、線支承に関してはアンカーボルトと下沓凸部のせん断力の和を、ピン支承と支承板支承に関しては図-4で挙げた各部材ごとのせん断力で一番小さい値を支承部の構造的要因による抵抗力とし、線支承を式(4)でピン支承と支承板支承を式(5)で表わす。

$$R_b = 0.7\sigma_1 a_1 N_1 N_2 + 0.7\sigma_2 a_2 N_2 \quad \text{式(4)}$$

$$R_b = \begin{cases} 0.7\sigma_1 a_1 N_1 N_2 \\ 0.7\sigma_2 a_2 N_2 \end{cases} \quad \text{式(5)}$$

ここに、 $\sigma_1$ :ボルトの降伏耐力[N/mm<sup>2</sup>],  $\sigma_2$ :下沓凸部の降伏耐力[N/mm<sup>2</sup>],  $a_1$ :ボルトの断面積[mm<sup>2</sup>],  $a_2$ :下沓凸部の断面積[mm<sup>2</sup>],  $N_1$ :1支承当たりのボルトの数,  $N_2$ :1径間当たりの支承の数。

### 4. 流体力・抵抗力の計算

本研究では上部構造水没時の流速と支承部の摩擦係数及びボルト部もしくは下沓凸部の降伏耐力を確率密度関数として計算することで、流体力 $S$ と抵抗力 $R$ に変

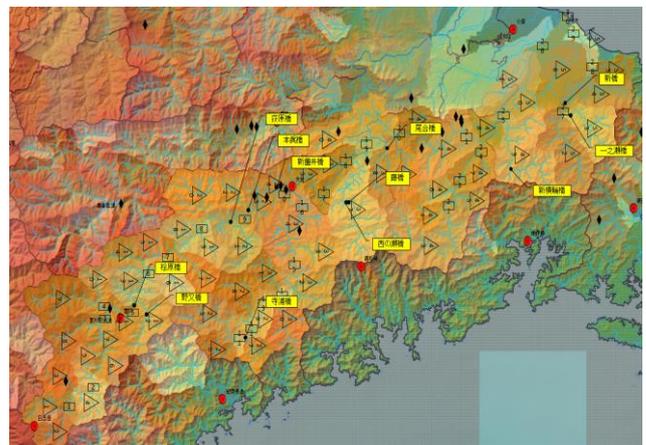


図-3 対象橋梁位置図

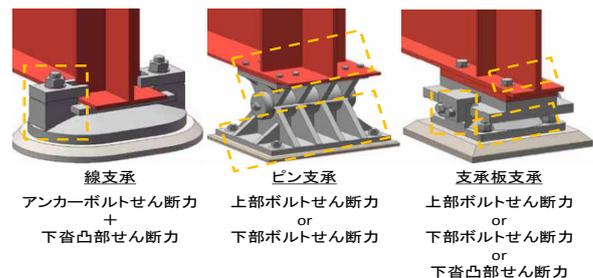


図-4 支承の種類と抵抗力

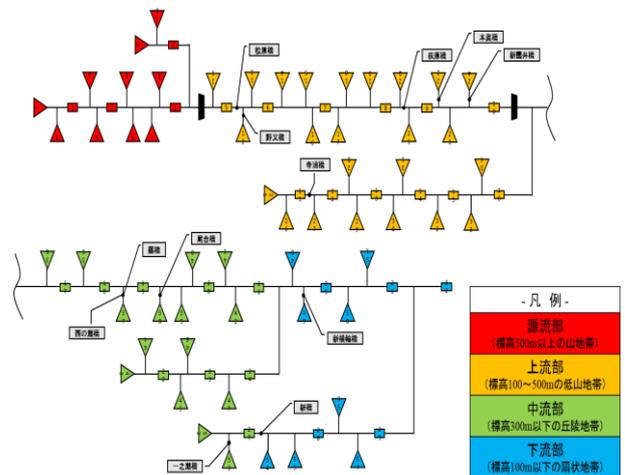


図-5 宮川水系モデル化

動性を与えた。流体力の確率密度関数を作成する為の流速データは、貯留関数法を用いて各対象橋梁地点に発生する流量を算出し、それを流速へ変換する方法で収集した。まず各対象橋梁地点での流量を算出する為には、図-5のように宮川水系を流域・河道ブロックに分けてモデル化し、ブロックごとに計算を行い流量を算出した。貯留関数法に入力データとして用いる降水量は、宮川水系内もしくは近傍に存在しデータ欠損の少ない7つのアメダス観測点のデータを用いた。降水量データの期間は1982年から2016年までの35年間分の時間降水

量を用いた。貯留方程式は貯留量と流出量との間に一価の線形関係があるものと仮定し、式(6)と式(7)で表わす。

$$s = kq \quad \text{式(6)}$$

$$\frac{ds}{dt} = r_e - q \quad \text{式(7)}$$

ここに、 $s$ :貯留量[mm],  $k$ :パラメータ,  $q$ :流出高[mm/h],  $r_e$ :有効降雨強度[mm/h].

ここで、流出による貯留量のパラメータ $k$ と有効降雨強度 $r_e$ はそれぞれ式(8)と式(9)で表わす。

$$k = 2.5 \left( \frac{n}{\sqrt{i}} \right)^{0.66} A^{0.24} \quad \text{式(8)}$$

$$r_e = fr \quad \text{式(9)}$$

ここに、 $n$ :等価粗度,  $i$ :斜面勾配,  $A$ :流域面積[km<sup>2</sup>],  $f$ :流出率(0.7),  $r$ :流域平均降雨強度[mm/h].

次に、計算流量 $Q$ の式は式(10)で表わされる。

$$Q = \frac{1}{3.6} Aq + Q_b \quad \text{式(10)}$$

ここに、 $Q_b$ :基底流量[m<sup>3</sup>/s].

貯留関数法により求めた流量は、洪水伝播速度式であるKleitz-Sedon式においてManning式を用いて流速に変換する。求めた流速は式(1)に代入し流体力を算出する。流速の変換式を式(11)に示す。

$$c = \frac{5}{3} \left( \frac{Q}{B} \right)^{0.4} i^{0.3} \quad \text{式(11)}$$

ここに、 $Q$ :計算流量[m<sup>3</sup>/s],  $B$ :河川断面を矩形水路と仮定した時の川幅[m],  $n$ :マンニングの粗度係数,  $i$ :河床勾配.

抵抗力に関して、支承部の摩擦係数とボルト・下沓凸部の降伏耐力の値は、摩擦係数に関してはRabbatらの実験結果を参考に、ボルトの降伏耐力はSS400材を想定し、下沓凸部の降伏耐力はFC250材を想定し、変動性を与えた。

## 5. 確率密度関数の作成

流体力の確率密度関数を作成するにあたり算出した値は35年間分の35個の年最大流体力をとし、その値に対し確率紙で分布形の当てはめを行った。確率紙はGumbel 確率紙と対数正規確率紙にプロットした。その結果、各橋梁で当てはまる分布形を表-2に示し、各橋梁の確率密度関数を対象橋梁の中から7つ選び図-6に示す。また、抵抗力の確率密度関数は図-7に示す。

## 6. 破壊確率の計算

流体力 $S$ と抵抗力 $R$ の確率密度関数から上部構造の破壊確率を算出した。破壊確率の算出には非正規分布を正規分布として裾野近似するRackwitz-Fiessler法を用いて算出した。算出した破壊確率を条件付き破壊確率とする。この理由として、算出した流体力の確率密度関数

表-2

各橋梁が当てはまる分布形

橋梁名	従う分布形	R二乗値
桧原橋	対数正規分布	0.98
野又橋	Gumbel分布	0.97
新園井橋	Gumbel分布	0.99
本眞橋	Gumbel分布	0.98
荻原橋	対数正規分布	0.98
尾合橋	対数正規分布	0.99
藤橋	Gumbel分布	0.95
寺浦橋	対数正規分布	0.96
新横輪橋	Gumbel分布	0.98
新橋	Gumbel分布	0.98
一之瀬橋	Gumbel分布	0.99

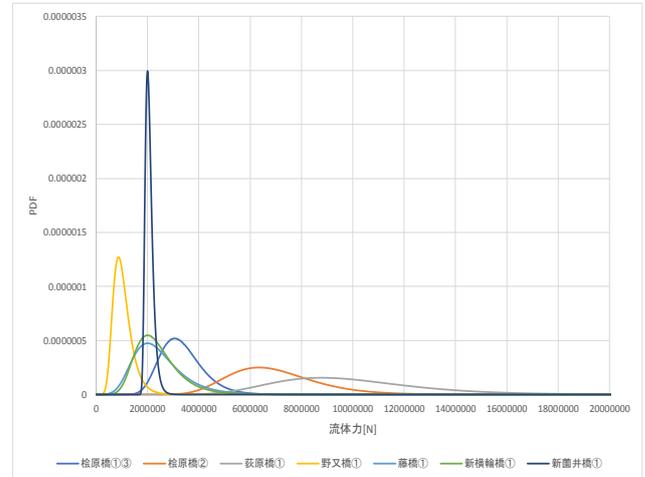


図-6 35年間分の年最大流体力から求めた流体力の確率密度関数

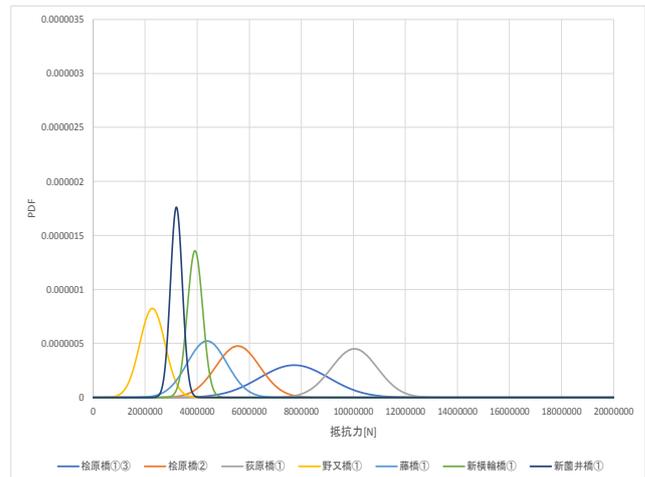


図-7 摩擦係数と各降伏耐力のばらつきから求めた抵抗力の確率密度関数

は、発生する流量の関係で水位が上部構造に達していない場合でも一様に達するとした条件の下で算出している為である。そこで次に、1年間で水位が上部構造まで到達する確率を求め、それを条件付き破壊確率に乘じた破壊確率を算出した。1年間で水位が上部構造まで到達する確率を算出するにあたり、各橋梁地点での水位一流量曲線を導く必要がある。その導出は既往研究<sup>5)</sup>により提案されている式(12)を用いて算出する事にした。

$$Q_i = \rho_i(H_i + w_i)^2 \quad \text{式(12)}$$

ここに、 $Q$ :流量[m<sup>3</sup>/s]、 $H$ :水位[m]、 $\rho \cdot w$ :未知パラメータ。

未知パラメータ $\rho \cdot w$ は任意の流量と水位、ここでは $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $H_1$ 、 $H_2$ とした時、式(13)と式(14)で表わされる。

$$\rho_2 = \frac{Q_1}{(H_1 + w_2)^2} \quad \text{式(13)}$$

$$w_2 = \frac{H_2 \sqrt{\frac{Q_1}{Q_2}} - H_1}{1 - \sqrt{\frac{Q_1}{Q_2}}} \quad \text{式(14)}$$

以上より、算出した水位—流量曲線から1年間で水位が上部構造まで到達する確率を求め、条件付き破壊確率に乗じたものを破壊確率として表-3に示す。但しこの確率は、水位が上部構造まで達さずに桁下を通り過ぎる可能性は考慮したが、水位が上部構造水没にまで達し、河道から溢水した後の事象を考慮できていない。つまり流体力を実現現象よりも過大評価してしまっている可能性がある。その為、橋梁によっては破壊確率が大きな値をとると考えられる。

## 7. おわりに

本研究では三重県の宮川水系内に架かる橋梁を対象とし、河川増水に起因する上部構造流出被害に関して、破壊確率の計算を行った。まず1年間の条件付き破壊確率を見ると、図-5のように松原橋や荻原橋のような宮川水系の主河道上に位置する橋梁は、発生流量が増大し、破壊確率の増大が見られる。一方で、藤橋や新横輪橋など主河道上に位置していない橋梁でも大きな破壊確率が見られる。これは、広い流域面積による発生流量の増大、且つ抵抗力も比較的小さいため破壊確率の増大に繋がったと考えられる。

次に水位が上部構造に達さずに桁下を通り過ぎる事象を加味した1年間の破壊確率を見る。まず荻原橋に着目すると、荻原橋地点では河川断面が大きく、上部構造に水位が到達する確率が低い事から、条件付き破壊確率で約43%あった確率が約4%にまでに低減している。その結果、新横輪橋よりも破壊確率が低い結果となった。次に松原橋に着目すると、同じ橋梁でも径間毎で破壊確率に約15%もの差が出ていることが分かる。これは図-2に示すように流速に直接効いてくる投影面積、また、支承数の違いがこのような差を生んだと考えられる。

以上より破壊確率の変動は、発生流量に大きく左右され、特に主河道上や流域面積が大きい地点・河川断面が小さい地点での破壊確率が大きくなる。また橋梁構造側から見て破壊確率は、支承数が多いほど有効的に減少し、また、投影面積が小さいほど有効的に減少

表-3 各橋梁の1年間の破壊確率

橋梁名	信頼性指標 $\beta$	1年間の条件付き破壊確率 [%]	1年間の水位上部構造到達確率 [%]	1年間の破壊確率 [%]
松原橋①③	2.98	0.145	25.714	0.037
松原橋②	0.67	25.114	60.000	15.068
野又橋①	2.65	0.406	57.143	0.232
新園井橋①	3.54	0.020	0.000	0.000
新園井橋②	7.65	0.000	97.143	0.000
本真橋①③	5.21	0.000	0.000	0.000
本真橋②	5.19	0.000	0.000	0.000
荻原橋①	0.18	42.884	8.571	3.676
尾合橋①	8.62	0.000	36.364	0.000
藤橋①	1.54	6.125	0.000	0.000
寺浦橋①②	4.46	0.000	0.000	0.000
新横輪橋①	1.60	5.505	94.286	5.191
新橋①②③	4.00	0.003	100.000	0.003
一之瀬橋①③	4.90	0.000	0.000	0.000
一之瀬橋②	4.91	0.000	0.000	0.000

※1年間の破壊確率は溢水後を考慮できていない。

する事が分かった。また表-3の結果からは、橋梁毎で孕んでいるリスクの分類ができる。例えば新橋では、上部構造に流体力が作用し流出するリスクは低いが、上部構造が水没するリスクは極めて高い。一方で荻原橋に着目すると、上部構造に流体力が作用し流出するリスクは極めて高いが、上部構造が水没するリスクが低いことが分かる。つまり表-3より、条件付き破壊確率が大きい橋梁は、流体力に対し弱い構造を持つ橋梁。水位上部構造到達確率が大きい橋梁は、洪水時に上部構造が水没し易い位置に存在する橋梁。破壊確率が大きい橋梁は、これらを加味した上で上部構造流出の危険性が高い橋梁。この様に橋梁の危険性を分類することができる。その結果、橋梁毎で必要とされる対策が打てるようになると言える。

今後の課題としては、今回求めた破壊確率は、6章で述べた通り溢水後の事象が考慮できておらず、流体力を実現現象よりも過大評価してしまっている可能性がある点。そして、流体力の作用方向として橋軸直角方向のみを考慮しており、鉛直上向き方向に働く力、またそれに伴い上部構造に発生するモーメント作用の考慮ができていないなど、より実現現象に近づけた評価を行う必要がある。

## 参考文献・出典

- 1) 玉井信行, 石野和男ら: 豪雨による河川橋梁災害—その原因と対策—, 技報堂出版, 2015年
- 2) 三重河川国道事務所 宮川流域図  
[http://www.cbr.mlit.go.jp/mie/river/river\\_area.html](http://www.cbr.mlit.go.jp/mie/river/river_area.html)
- 3) 津波による橋梁構造物に及ぼす波力の評価に関する調査研究委員会報告書, 土木学会, 2013年
- 4) 道路橋示方書・同解説 共通編, 日本道路協会, 2002年
- 5) 田村隆雄ら: 雨量・水位データと流出モデルを用いた水位流量曲線作成法の実用性, 土木学会論文集B1, Vol.69, No.4, 2013年